

赵晓同, 苏军德, 刘鹏, 等. 生态保护红线对区域生态系统服务供需的影响[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(2): 191–202. Zhao Xiaojiong, Su Junde, Liu Peng, et al. The impact of ecological conservation red line on the supply and demand of regional ecosystem services[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(2): 191–202.

生态保护红线对区域生态系统服务供需的影响

赵晓同^{1,2,3*}, 苏军德⁴, 刘鹏¹, 马啸宙¹

(1. 甘肃省生态环境科学设计研究院, 甘肃 兰州 730020;

2. 甘肃省生态文明建设研究中心, 甘肃 兰州 730020;

3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000;

4. 甘肃有色冶金职业技术学院, 甘肃 金昌 737100)

摘要:生态系统服务供需关系的空间格局可为生态保护管理政策提供可视化的指导信息。由中国首次提出的生态保护红线为区域生态保护提供了严格的政策遵循,但目前生态保护红线对区域生态系统服务供需关系的影响研究还较少。该研究以甘肃省为例,基于2000–2020年的生态系统格局数据,采用生态服务供需评价矩阵,引入相关供需指数指示生态服务匹配状况,定量评估了甘肃省生态保护红线对生态系统服务供需的影响,研究表明:(1)自2000年以来,人类活动较低的生态保护红线区供需盈余较多,而人类活动较高的甘肃中部和北部绿洲区,供需比较低,处于或接近赤字状态,出现空间上供需错配;(2)省域范围内生态系统服务赤字总体上均有加剧的趋势,而生态系统服务盈余略有增加,生态保护红线区的生态系统服务赤字总体上比省域范围内的小,生态系统服务供需盈余水平下降的区域集中在非生态保护红线区;(3)甘肃省大部分地区属于H-L、L-L格局,生态保护红线政策实施以来,生态系统服务供需模式不平衡在逐渐缩小,但是甘肃省中部依然是供需矛盾最突出的区域。研究结果可为区域生态服务供需格局优化和构建西北生态安全屏障等规划管理提供科学依据与理论支撑。

关键词:生态保护红线; 生态系统服务; 供需指数; 梯度分析; 甘肃省

中图分类号:X32 **文献标志码:**A **doi:**10.19672/j.cnki.1003-6504.1783.24.338 **文章编号:**1003-6504(2025)02-0191-12

The Impact of Ecological Conservation Red Line on the Supply and Demand of Regional Ecosystem Services

ZHAO Xiaojiong^{1,2,3*}, SU Junde⁴, LIU Peng¹, MA Xiaozhou¹

(1. Gansu Academy of Eco-environmental Sciences, Lanzhou 730020, China;

2. Gansu Ecological Civilization Construction Research Center, Lanzhou 730020, China;

3. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4. Gansu Vocational & Technical College of Nonferrous Metallurgy, Jinchang 737100, China)

Abstract: Spatial patterns in ecosystem services (ES) supply and demand can provide useful visual guidance information for ecological protection management policies. In China, the concept of the Ecological Conservation Red Line (ECRL) was introduced to provide strict protection for areas, but its effect on ES supply and demand is not fully understood. Taking Gansu Province as an example, based on the ecosystem pattern data from 2000 to 2020, a regional ES supply and demand evaluation matrix was employed, and relevant supply and demand indexes were introduced to delineate the supply and demand zones for various ES within the region. The impact of ECRL on the supply and demand of ES was quantitatively evaluated. The results showed that there were higher supplies and lower demand and more surpluses with low human activities in the ECRL, while the center and northern oasis areas in the Province where there was intensive human activities, and there was low ES supply and high demand from 2000 to 2020. The deficit of ES within the provincial regions was generally increasing, while the surplus of ES has slightly increased. The deficit of ES in the ECRL was generally smaller than that within the provincial scope, and regions with declining surplus levels of ES supply and demand were concentrated in non-ECRL areas. Most of the regions belonged to the H-L and L-L pattern in the Province. The regions with imbalanced supply and demand

of ES were mainly concentrated in areas with higher economic levels. After the implementation of the ECRL policy, the proportion of negative changes and positive changes in the supply and demand pattern of ES has decreased and increased in both the ECRL and the Province. The imbalance in the supply and demand pattern of ES was gradually shrinking. However, the central part of the Province was still the most prominent area of supply-demand contradiction. The research results can provide scientific basis and theoretical support for optimizing the supply and demand pattern of regional ES and building a northwest ecological security barrier for planning and management.

Key words: ecological protection red line; ecosystem services; supply-demand index; gradient analysis; Gansu Province

生态系统服务是自然生态系统直接或间接为人类提供的惠益^[1-3],在人类社会与自然系统之间起到了桥梁沟通纽带作用^[4,5]。生态系统服务供给是指某地区在一定时间段内提供特定生态系统服务的能力,而生态系统服务需求则是某地区在一定时间段内当前消费、使用的所有生态系统服务之和^[6]。两者都反映了生态系统与人类社会系统之间复杂的动态关系^[7,8]。由于人类对生态系统需求的增加,许多地区生态系统服务供应已出现短缺而供需失衡,对生态系统健康和人类社会的可持续发展构成严重威胁^[9]。为此可通过一些生态保护管理政策最大限度地减少多种生态系统服务供需之间的矛盾,对于实现可持续生态系统服务管理的目标至关重要^[9-11]。

2017年以来,我国实施了最严格的生态保护制度——生态保护红线政策,它对维护生态稳定具有重要的指导意义和管理价值^[12,13]。生态保护红线的管理目标是提高区域生态产品和生态系统服务的供给水平,最大限度降低人类活动干扰,其本质是确保生态系统服务的供应大于需求^[13],也就是生态系统服务供给与需求的“匹配”。然而,生态保护红线政策实施后如何以及多大程度上影响区域生态系统服务供需,其对区域生态环境是否真正起到了保护作用,这些都不清楚。在此背景下,定量评估生态保护红线对生态系统服务供需的影响,对其实施效果评价、空间布局优化、生态环境效应分析等具有重要意义。

目前,对生态系统服务的供需研究,主要关注生态系统服务供给-需求匹配研究,用以揭示区域资源短缺^[14-17];阐明基于土地利用和土地覆盖的生态系统服务供需的空间匹配及其动态变化特征^[18-20];评估生态系统服务供需之间的不匹配,为城市管理提供决策参考信息^[21-23];提出了生态系统服务供需比指数、供需匹配度指数、土地开发指数(LDI)、供给指数(ESPI)等来表征生态系统服务的供需匹配^[24-28]。这些研究有助于我们理解不同背景下生态系统服务的供需匹配状况。然而,针对生态保护红线,定量开展生态系统服务供需的研究还很少^[29],当前研究主要是基于生态系统服务功能及其价值评估^[30],来评价生态保护红线区

生态系统服务的变化其保护效果。

甘肃省地处黄河上游,是我国西部生态安全屏障,承载着生态系统服务的重要功能,同时该区域生态环境极其脆弱、敏感。当前,甘肃省处于生态环境高水平保护与社会经济高质量发展的关键时期,在最严格的生态保护制度下,如何通过生态系统服务供需研究来指导脆弱敏感生态环境下的水土资源合理配置,更好地契合发展新质生产力战略,是当前甘肃省面临的重大课题。因此,本文以甘肃省为研究对象,采用分区域生态系统服务供需评价矩阵,选取11项生态系统服务,识别区域内各项生态系统服务的供给与需求区域及差异,明晰甘肃省及生态保护红线区生态系统服务供需的数量及空间匹配关系,阐明生态系统服务供需失衡和供需格局时空变化情况,进而揭示生态保护红线对区域生态系统服务供需的影响差异,不仅可以丰富生态系统服务相关研究,支撑黄河上游生态环境高水平保护,还有利于促进区域新质生产力发展,进而推动甘肃省高质量发展。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

甘肃省位于我国西北地区,涵盖黄河、长江、内陆河三大流域,行政区域涉及14个市州及兰州新区,总面积达42.58万km²。省域内地形复杂,地势自西南向东北倾斜(图1)。省域内生态系统类型多样,因水热条件差异较大,发育有森林、草原、荒漠、湿地、农田、城市等6类生态系统。甘肃省生态地位重要,在保障国家生态安全中具有举足轻重的地位。

1.2 数据来源

1.2.1 生态系统类型数据

本研究所用的2000-2015年的生态系统类型数据来源于全国生态系统类型数据库,该数据由生态环境部卫星应用中心联合中国科学院生产,采用基于面向对象的分类方法,全国建立大约200个解译标志库,对30 m分辨率的Landsat TM/ETM、5 m或2.5 m的SPOT5、30 m分辨率的ENVISAT、ASAR、HJ-1遥感影像进行分类解译。甘肃省生态系统分类数据的时间

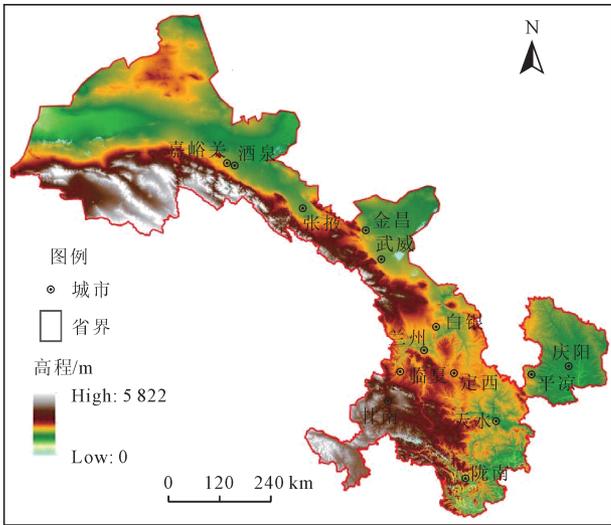


图1 甘肃省地理位置及高程

Fig.1 Geographical location and elevation of Gansu Province for 2000年、2005年、2010年、2015年。结合2 508个地面核查点的数据,其分类的总体精度达到85%以上^[31]。甘肃省包括9个一级类、19个二级类和38个三级类的生态系统类型,根据研究需要,将研究区生态系统类型整合为7个一级类(森林、灌丛、草地、耕地、湿地、建设用地、荒漠),21个二级类(落叶阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、落叶阔叶灌丛、草甸、草原、其他草地、水田、旱地、园地、草本湿地、湖泊、水库、河流、城市绿地、建设用地、裸岩、裸地、沙漠、盐碱地、冰川),见图2。

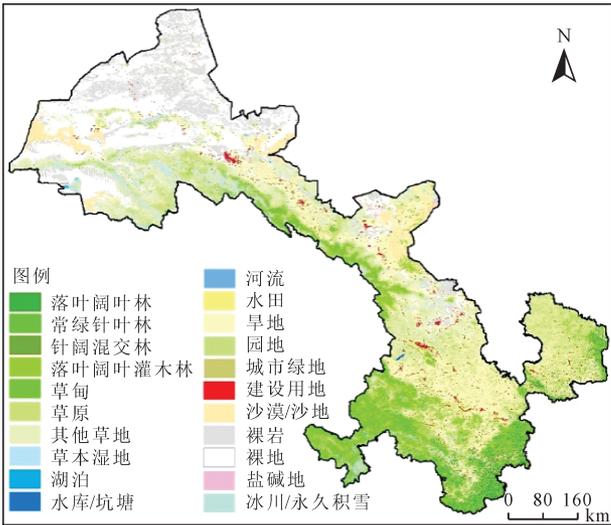


图2 2020年甘肃省生态系统空间分布图
Fig.2 Spatial distribution map of ecosystem in Gansu Province from 2000 to 2020

2020年的生态系统类型数据由人工目视解译获得。本文在解译2020年生态系统类型数据时,考虑到与2000-2015年生态系统类型数据的一致性和可比性,选择以2015年生态系统类型数据为基础,以2020年夏季Landsat8遥感影像为底图,对涉及甘肃省的32景遥感影像进行预处理后,以21个二级类为分类标

准,人工目视解译2015年生态系统类型相比于2020年Landsat8遥感影像判读发生变化的区域,对不确定区域的识别,参考2020年GlobeLand30地表覆盖数据和高分系列遥感影像。

对解译得到的2020年生态系统系统格局的精度检验,主要验证2015年与2020年发生变化的区域的类型,故本文将解译得到的发生变化区域随机生成680个随机点,以每个随机点对应的高分遥感影像判读结果,通过混淆矩阵进行验证,解译结果总体精度达到87%。

本研究参考学者研究方法^[32]对生态系统类型的调整与归并方法,确定了本研究的生态系统分类体系。

1.2.2 生态保护红线数据

甘肃省生态保护红线数据来源于环境保护部门。甘肃省生态保护红线划定总面积12.54万km²,占甘肃省总面积的29.46%,主要分布在阿尔金山东段、祁连山北麓山地、河西走廊西北部、黑河中下游荒漠区、腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠边缘、陇中黄土高原低山丘陵沟壑区、六盘山-子午岭山地次生林区、西秦岭落叶阔叶林区、“两江一水”流域及高山林区、甘南高原高寒草甸区、甘南山地寒温带针叶林区。

1.2.3 其他地理数据

本研究用到的2020年甘肃省GDP和人口数据为1 km网格的空间分布数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOI>),2017.DOI:10.12078/2017121102)。

1.3 研究方法

1.3.1 基于生态系统类型的生态系统服务供需评价矩阵

本研究参考学者们对甘肃省生态系统服务类型的相关研究^[32],结合甘肃省一般自然生态环境状况和不同区域特有的自然生态环境特征,选取11项生态系统服务类型,分别为供给服务(农作物、牲畜、淡水)、调节服务(当地气候调节、空气质量调节、地下水补给、土壤保持、防风固沙、水净化)、文化服务(娱乐美学价值)以及生物多样性保护价值。

不同生态系统根据其结构和过程而具有不同的功能,其为人类提供特定生态系统服务的能力可能存在很大差异^[33]。生态系统可以提供一系列潜在的生态系统服务,其大小可以通过潜在供给服务能力评分矩阵来衡量;只有当人类实际消费服务或者对生态服务产生需求时,一部分潜在生态服务或者全部潜在生态服务将会转化为实际生态服务,转化量可通过实际供给服务能力评分矩阵来衡量。此外,为评估人类对生态系统服务的需求强度,需要掌握人们对生态系统

服务的实际使用的情况,一般可根据专家经验知识构建生态系统服务需求强度矩阵。为此,本研究对生态服务供给与需求评价参考Burkhard等^[34]提出的基于生态系统类型的生态系统服务供需评价矩阵,它将生态系统类型与生态系统服务和需求链接起来,很好地解决了生态系统服务评价的复杂性和评价结果的可比性的问题,该方法包括供给服务和需求服务评价矩阵。本研究中直接采用前期研究^[32]基于生态系统服务供需评价矩阵,通过专家打分法构建的涉及甘肃省的21种生态系统类型与11种生态系统服务的潜在供给、实际供给和需求服务评分矩阵。特别地,在潜在供给、实际供给和需求服务评分矩阵中,一方面在大尺度上首次充分考虑甘肃省不同区域的供给能力或需求强度的差异性,而分区域构建评价矩阵。另一方面在景观类型尺度上,针对需求服务,考虑了不同景观类型的需求强度差异,例如在人类主导的建成景观中,需求水平高于其他类型的景观;自然生态系统类型因其人口分布和较低的产品消费而需求水平低;耕地在调节服务方面具有较高的需求值,故本研究的供需评分矩阵在宏观尺度上科学性较强。

1.3.2 生态系统服务供需指数

本研究以网格为评价单元来测度生态系统服务供需关系。利用ArcGIS空间分析工具对研究区域进行网格化,提取大小为1 km×1 km的完整网格,该评价网格尺度相对更接近甘肃省一般村庄和乡镇的平均大小,在该尺度下评价供需关系,在行政管理上也更为科学合理,参考价值更大。

本研究以生态系统服务供需评价矩阵为基础,按照公式(1)和(2)计算生态系统服务的潜在供给能力(E_s)、实际供给能力(E_s')以及需求强度(E_d)。进而利用公式(3)计算供给率(R_1),供给率反映了生态系统服务的潜在供给向实际供给转化的能力大小,其值越高,表明生态系统服务的潜在供给转化为实际供给的能力越强,说明生态系统提供的服务被人类所开发利用的越多。此外,利用公式(4),计算供需比(R_2)^[35]。供需比表示生态系统实际供给能力与服务需求强度之间的一种平衡程度,其值越高,表明生态系统服务的供需盈余越高。

$$E_s(E_s') = \frac{\sum_{k=1}^i E_k M_k}{M_i} \quad (1)$$

$$E_d = \frac{\sum_{j=1}^i E_j M_j}{M_i} \quad (2)$$

$$R_1 = \frac{E_s'}{E_s} \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{E_s' - E_d}{(E_s + E_s')/2} \begin{cases} > 0, \text{盈余} \\ = 0, \text{平衡} \\ < 0, \text{赤字} \end{cases} \quad (4)$$

式中, R_1 为生态系统服务供给率, R_2 为生态系统服务供需比, E_s 为生态系统服务的潜在供给能力, E_s' 为生态系统服务的实际供给能力, E_d 为生态系统服务的需求强度, E_k 表示 k 类生态系统的潜在(实际)服务供给能力; E_j 表示 j 类生态系统的需求强度值; M_k 为网格中 k 类生态系统的面积,km²; M_j 为网格中 j 类生态系统的面积,km²; i 为网格中生态系统类型数量,个; M_i 为网格面积,km²。

1.3.3 生态系统服务供需空间梯度分析

为探究甘肃省城乡生态系统服务供需盈亏沿空间梯度上的变化趋势和规律,本文参考前人研究^[36,37]引入空间梯度分析方法。按照东西、南北方向上生态保护红线的空间分布状况,重点考虑丝绸之路甘肃段经过的节点城市,并充分涵盖全省地级城市,兼顾部分县级城市,确定了南北、东西两条梯度带。其中,南北带以陇南市文县为起点,途径陇南市、定西市、兰州市、白银市、武威市、金昌市、张掖市、酒泉市、嘉峪关市等城市主城区,最后以酒泉市阿克塞县为终点;东西带以庆阳市主城区为起点,途径平凉市、天水市、临夏州、甘南州主城区,最后以甘南州玛曲县为终点,两带以1 km 格网为带宽形成城市间发展梯度带,以此范围来提取梯度带内的生态系统服务供需比。

1.3.4 生态系统服务供需格局分析

生态系统服务供需匹配模式可反映生态系统服务实际供给能力和需求强度之间的空间匹配程度,有助于直观理解生态系统服务供需发展的和谐程度和可持续性^[38]。本文参考黄智洵等^[39]的研究成果,采用Z分值标准化方法对生态系统服务供需比标准化后确定生态系统服务供需匹配模式。坐标轴的X轴代表标准化的实际供给能力,Y轴代表需求强度,绘制供需散点图。供需散点图分为4个象限分别是:高供给-高需求(H-H),低供给-高需求(L-H),低供给-低需求(L-L)和高供给-低需求(H-L)。计算公式如下:

$$X = \frac{X_i - X'}{S} \quad (5)$$

$$X' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X - X')^2} \quad (7)$$

式中, X 是标准化的实际供给能力、需求强度, X_i 是第 i 个评价单位实际供给能力、需求强度, X' 是

平均值, S 是标准偏差, n 是总的栅格数。通过 ArcGIS 软件的空间分析模块将 2000–2020 年标准化后的实际供给能力、需求强度经过空间叠加分析匹配模式。

2 结果与分析

2.1 生态系统供需指数空间格局

从图 3 供给率分布图中可以看出, 2000–2020 年甘肃省生态系统服务供给率从东南到西北逐渐增加, 甘肃西北部供给率最高, 说明甘肃西北部生态系统服务实际供给的转化率比其他区域高, 处于高位供应状态, 这些区域属于绿洲–荒漠区, 虽然该区域自然环境状况较差, 但其提供服务的能力较强, 主要提供防风固沙服务, 降低了该区域土地荒漠化程度。生态系统服务已被较为充分的挖掘, 其可供挖掘潜力较小。而甘肃东南部生态系统服务实际供给的转化率较低, 尤其是甘肃中东部的兰州、定西、平凉等地, 主要提供土壤保持服务, 但是由于实际供给的转化率较低, 该区域一直以来是全省水土流失最为严重的地区, 土壤保持服务没有被很好的挖掘; 而生态保护红线区生态系统服务供给率整体上与全省的分布格局一致, 甘肃西北部的生态保护红线区多为荒漠类自然保护区 (11 个荒漠类保护区, 占西北部自然保护区数量的 84.62%), 主要保护荒漠生境, 虽然其提供的潜在防风固沙服务、生物多样性维护等服务较低, 但其实

际供给服务的转化率较高。南部生态保护红线区生态系统提供的实际供给服务, 其转化率虽然也较低, 但因该区域生态条件较好, 其实际供给服务相对其他区域仍然较高。

从图 3 供需比分布图可以看出, 甘肃省中部地区的白银、定西、兰州、天水等地生态系统服务供需比较低, 部分区域处于负值, 也就是说这些地区生态系统服务供需处于或接近赤字状态, 这些区域是甘肃省人口数量最多的区域, 人类对生态系统服务的需求旺盛。甘肃省西北部的武威、金昌、张掖等地, 生态系统服务供需比处于较低水平的区域主要位于绿洲区, 说明绿洲区生态系统服务需求旺盛, 生态系统服务供需趋于赤字状态; 生态保护红线内生态系统服务供需比几乎都为正值, 甘肃北部生态保护红线区服务供需比高于南部, 说明生态保护红线区生态系统服务供需盈余较多, 这一方面与红线区服务供给较高有关, 另一方面也与红线区人类对生态系统服务的需求较低有直接关系。

人类活动较少的生态保护红线区供需比较高, 盈余较多, 而人类活动较高的甘肃中部和北部绿洲区, 供需比较低, 处于或接近赤字状态, 出现空间上供需错配, 以后需要重点关注这些区域, 加强生态系统管理。从生态系统服务流的角度对生态系统供给服务在空间分布上进行合理引导, 将盈余的供给服务引导至服务需求旺盛的区域。

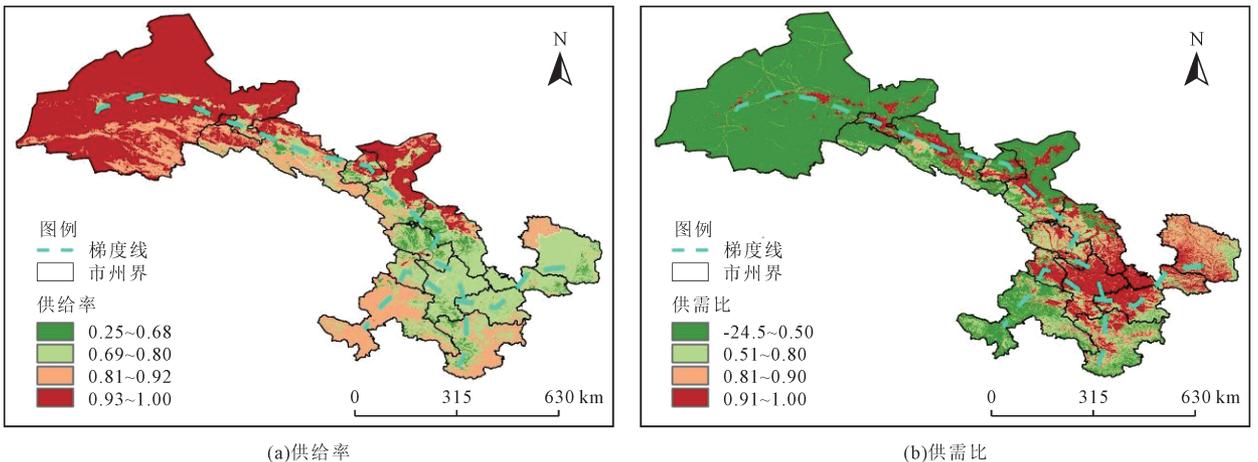


图3 2020年甘肃省生态系统服务供给率和供需比分布图

Fig.3 The ecosystem service supply-demand rate and supply-demand ratio in Gansu Province in 2020

南北带、东西带 2 条梯度带上的生态系统服务供需比空间分布见图 4。从图 4 可以看出, 甘肃省各城市之间的生态系统服务供需盈亏情况差别明显, 供需比值从城市中心区的低值向外明显增加至高值, 呈“V”或多“V”型分布, 总体上供需比在城市中心区的降低幅度明显, 生态环境较好地区的变化幅度相

对较小。

南北带主要经过陇南、定西、兰州、白银、定西、武威、金昌、张掖、酒泉、嘉峪关等城市的主城区, 东西带主要经过庆阳、平凉、天水、临夏、甘南等城市的主城区, 此梯度带上的生态系统服务供需盈亏状态呈现明显的“V”型分布, 且由南到北“V”型低值越来越小。

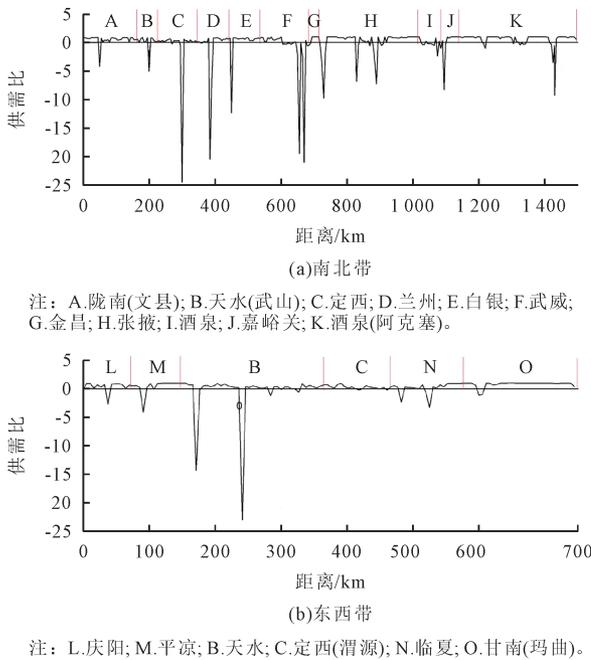


图4 甘肃省生态系统服务供需比的城乡梯度分布图
Fig.4 Urban-rural gradient analysis of ecosystem services supply-demand ratio in Gansu Province

南北带经过的城市基本都为丝绸之路节点城市,经过主城区,人口数量多、经济开发强度大,生态系统服务供需比较低;东西带经过的区域生态环境较好,以林地、草地为主,其中,位于该带上的定西市,由于梯度带经过的是县城区,因此“V”型分布不是很明显,生态系统服务供需盈亏状态也处于较高水平。

通过对比各市(州)生态保护红线,发现两条带上,总体上生态保护红线面积大,特别是生态保护红线分布距离城区较近的市、县,其供需比较其他市、县要低,这可能与生态保护红线的溢出效应有关,其保护成效对周边的辐射效应较明显。

2.2 生态系统供需指数数量特征

本文分别统计了2000–2020年省域和生态保护红线内供需比 <0 和供需比 >0 的平均值,见表1。

从表1可以看出,省域范围内生态系统服务赤字(供需比 <0)总体上均有加剧的趋势,而生态系统服务盈余(供需比 >0)略有增加(2000–2020年供需比指数平均增加了0.0102)。生态保护红线区生态系统服务赤字(供需比 <0)总体上比省域范围内的小,也就是说在生态保护红线区生态系统服务供需失衡矛盾有所缓解。在生态保护红线政策下,按照相关管理要求,生态保护红线内点状人类活动范围和强度会逐渐减少,有利于改善生态服务赤字。生态保护红线区生态系统服务盈余(供需比 >0)总体上比省域范围内的高,平均供需比指数达到0.9以上。表明社会经济的快速发展加剧区域生态服务需求强度越来越高,但是随着生态保护红线政策的实施,对生态保护红线内的人类活动(比如耕地、建设用地等)的逐步退出,该区域生态服务需求强度进一步降低,而供给能力随着生态环境的恢复和修复进一步提高,红线政策效应明显。

表1 省域、生态保护红线区生态系统服务赤字区和盈余区平均供需比统计表
Table 1 Statistics of average supply-demand ratio of ecosystem service deficit and surplus areas in provincial and ecological conservation red line areas

年份	生态系统服务赤字区		生态系统服务盈余区	
	省域	生态保护红线区	省域	生态保护红线区
2000	-0.727 7	-0.446 8	0.811 6	0.939 7
2005	-0.798 9	-0.463 7	0.813 4	0.940 1
2010	-0.908 9	-0.676 8	0.814 5	0.942 7
2015	-1.138 8	-0.762 6	0.816 6	0.942 5
2020	-1.125 5	-0.507 1	0.821 8	0.931 6

结合供需比的空间分布格局综合来看,省域范围内,河西走廊地区由于生态环境脆弱,绿洲区生态服务需求强度未来趋于加大,导致该区域生态服务盈余水平呈下降趋势,当然盈余水平下降的区域集中在非生态保护红线区。兰州、白银位于兰白都市圈和兰西城市群区域,而该区域也是生态保护红线分布最少的区域,受到生态保护红线的刚性约束有限。

2.3 生态系统服务供-需匹配分析

甘肃省域及生态保护红线区生态系统服务供需格局象限分布图见图5、图6。从图中可以看出,大部分地区属于H-L、L-L型,其在省域分别占24.76%、

49.69%,生态保护红线区分别占43.13%、54.24%;H-H型面积仅占省域和生态保护红线区总面积的12.25%、1.59%。

由图7可知,H-L格局的区域主要分布在生态保护红线区(占红线总面积的42.11%)以及甘肃省南部未划入生态保护红线区的森林、草地区域。这些区域较其他区域经济发展和城市化水平相对较低,而且是珍稀濒危野生动植物集中分布区。该区域2020年GDP占全省GDP的18.39%,人口占全省人口的20.61%,人口密度仅为51.12人/km²。祁连山地区森林资源丰富,蓄积量占全省资源的12.36%^[40,41],森林具有涵

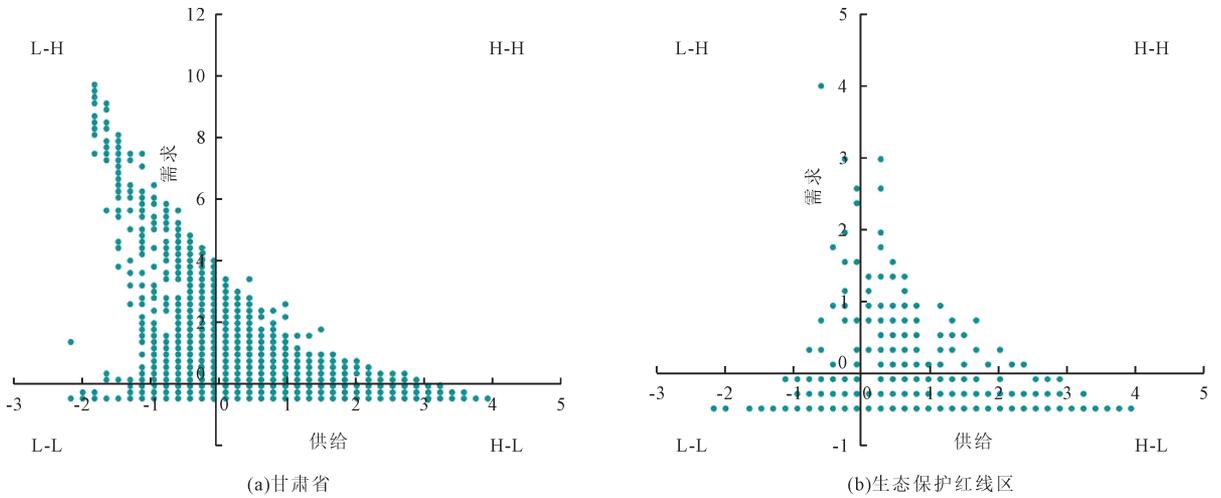


图5 2020年生态系统服务供需格局象限分布图
Fig.5 Quadrant diagram distribution of supply-demand patterns of ecosystem services in 2020

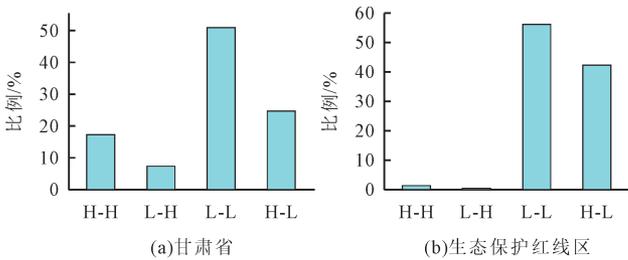


图6 2020年生态系统服务供需模式面积占比图
Fig.6 Percentage of supply-demand patterns of ecosystem services in 2020

养水源、保持水土和局地气候调节等作用,调节服务供给能力较强。甘肃南部灌丛、森林覆盖度较高,甘南高原以草地生态系统为主,人类活动对该区域扰动较少,供给能力较高而需求强度低。

L-H格局主要集中在经济水平较高的区域,包括甘肃西北部的河西走廊地区、甘肃中部的沿黄河地区以及陇东的平凉、庆阳等地。这些区域占到甘肃省国土面积的7.32%,2020年GDP占到25.72%,人口占到19.51%,人口密度达到162.24人/km²,人口密度高,工业化水平高,对生态系统服务的消费高,而区域森林、草原等自然生态系统面积很小,生态系统服务供给能力很弱,生态系统服务供给与需求之间的不平衡十分突出。未来该区域的供需不平衡仍旧会加大,生态保护红线政策的实施虽然不能从总体上改变这种进程,但可通过大力发展城市绿地系统,控制建设用地的无序扩张,提高土地的开发利用效率,能够在一定程度上缓解供需失衡。

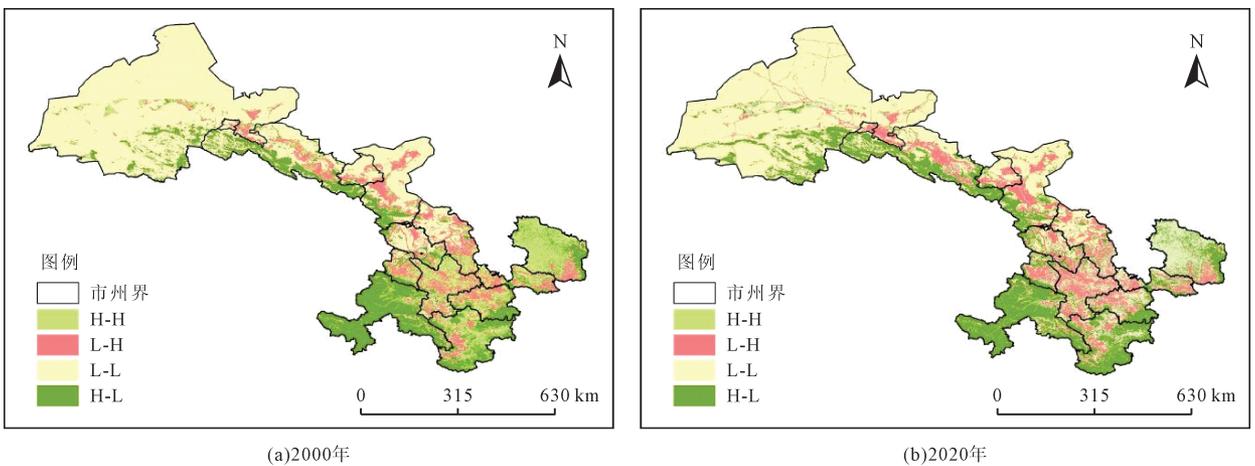


图7 2000-2020年甘肃省生态系统服务供需模式分布图
Fig.7 Distribution of supply-demand patterns of ecosystem services from 2000 to 2020 in Gansu Province

在4种格局中,L-L格局的面积最大,主要分布在甘肃西北部生态保护红线区(占红线总面积比例的56.13%)及其他荒漠区。这些区域自然环境较差,水资源匮乏,人口数量少(2020年人口数量占全省人口的17.43%,人口密度为仅为20.97人/km²),城市化水

平相对较低,而荒漠生态系统提供服务的能力又较低,同时人类对生态系统服务的需求也很低。未来随着国家和甘肃省新型能源的布局,该区域将面临着需求强度的增加。这些区域多为生态保护红线区,需要实行严格保护,减少人类活动的扰动,防止

荒漠生态系统退化,同时加强北部防风固沙林体系建设,改造农田防护林网,使生态系统服务供给能力最大化。

H-H格局主要位于甘肃西北部的绿洲区以及中部和东部,包括定西、天水、平凉、庆阳等地,2020年GDP占到31.53%,人口占到42.41%,人口密度达到149.33人/km²。这些区域是甘肃省人口数量较多的区域,社会经济发展水平较高,同时也是黄土高原水土保持重点生态功能区。随着社会经济的发展,人们对这些区域生态服务的需求强度持续加大,同时还面临着因耕地减少,水资源供给不足导致的生态系统服务供给

能力下降的风险,在当前生态保护红线分布格局下,仍不能有效提升该区域的供给能力或降低该区域的需求强度。未来可将该区域已退耕还林还草区适当划入生态保护红线,合理开发利用水土资源,引导超载人口逐步有序转移,促进区域人口、资源、环境的协调发展。

2000-2020年省域和生态保护红线区生态系统服务供需模式面积占比如图8所示。由于生态保护红线政策实施是在2015年以后,故以下划分2000-2015年和2015-2020年两个时段进行纵向对比分析。

从时间序列上来看,2000-2015年,全省和生态保护红线区的H-H和L-L的面积占比都呈持续减小

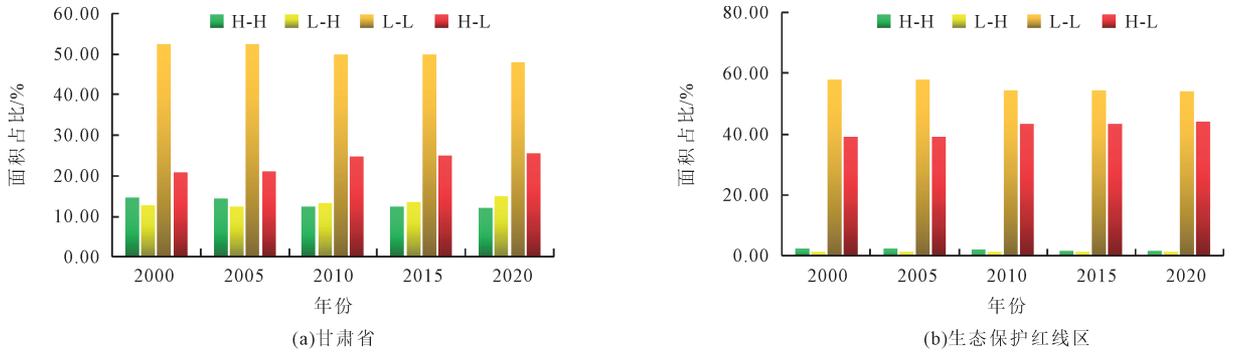


图8 2000-2020年生态系统服务供需模式面积占比图
Fig.8 Proportion of area of ecosystem service supply and demand model from 2000 to 2020

趋势。其中,省域分别减少了2.18%、2.70%;生态保护红线区分别减少了0.77%、3.38%。全省L-H面积占比呈持续增加趋势而在红线区则持续减少,省域增加了0.81%,生态保护红线区减少了0.06%。全省和生态保护红线区的H-L的面积占比都呈持续增加趋势,省域和生态保护红线区分别增加了4.09%、4.19%。至2020年,省域和生态保护红线区H-L模式的分布范围将在2015年以后继续呈增加趋势,分别增加了0.73%、0.55%,而生态保护红线区L-H模式的分布范围呈减少趋势,减少了0.16%;省域和生态保护红线区H-H和L-L两种模式的分布范围则在2015以后均呈减少趋势,分别减少了0.25%、1.85%和0.22%、0.42%。

一般认为,生态环境保护程度越高,高供给-低需求(H-L)模式的分布范围将越大,越有利于维持供需平衡。若一项政策的实施能减小低供给区的高需求强度或提升高需求强度区的供给能力以及减小高供给区的高需求强度,则该项政策有利于区域可持续发展。对比两个时段,一方面,生态保护红线政策实施后高供给-低需求呈持续增加趋势,至2020年比2015年以前的增幅要大;另一方面,生态保护红线区高供给-低需求面积均有不同程度的增加,生态保护红线政策实施后增加幅度最大。综上所述,生态保护红线

政策实施后,显著提高了生态保护红线区,乃至全省的可持续发展水平。

2.4 生态系统服务供需模式变化分析

在本研究中,为了获取供需模式如何从一种类型变化为另一种类型,采用转移矩阵分析了生态系统服务供需模式在2000-2020年的变化情况。从表2、表3可以看出,2000-2020年,全省的H-L和L-H模式的变化最为显著,而生态保护红线区则是H-L和L-L模式变化最为显著。全省H-H到H-L、L-L到H-L和H-H到L-H分别占到甘肃省国土面积比例的1.83%、4.59%和2.73%,红线区L-L到H-L和H-L到L-L分别占红线区面积比例的5.97%、1.54%。H-H到H-L模式主要位于陇南、平凉中部、庆阳北部;L-L到H-L模式主要位于临夏北部和甘肃西北部的生态保护红线区,生态系统服务的供给能力在这些区域有显著的提高,这得益于近年来对祁连山地区和北部风沙带的生态治理和生态恢复工程,在很大程度上改善了当地的生态环境,增加了植被覆盖度;H-H到L-H模式主要位于生态保护红线区外的平凉、陇南西北部、定西、兰州中东部,是国家城市化发展地区,也是全省产业和人口聚集度最高的核心经济区,人类活动对该区域的自然生态系统扰动较大。

表2 2000-2020年甘肃省生态系统服务供需模式转移矩阵

Table 2 Transformation matrix of supply-demand patterns of ecosystem services in Gansu from 2000 to 2020 under four scenarios (%)

年份	类型	2020				合计
		H-H	L-H	L-L	H-L	
2000	H-H	9.69	2.73	0.24	1.83	14.49
	L-H	1.62	10.07	0.59	0.24	12.53
	L-L	0.26	1.80	45.66	4.59	52.31
	H-L	0.49	0.10	1.19	18.88	20.67
	合计	12.06	14.70	47.69	25.55	100.00
	变化	2.37	4.63	2.03	6.66	15.68

表3 2000-2020年生态保护红线区生态系统服务供需模式转移矩阵

Table 3 Transformation matrix of supply-demand patterns of ecosystem services in ECRL from 2000 to 2020 under four scenarios (%)

年份	类型	2020				合计
		H-H	L-H	L-L	H-L	
2000	H-H	1.25	0.22	0.06	0.90	2.43
	L-H	0.20	0.72	0.18	0.09	1.19
	L-L	0.11	0.63	50.76	5.97	57.47
	H-L	0.49	0.05	1.54	36.82	38.90
	合计	2.05	1.63	52.54	43.78	100.00
	变化	0.80	0.91	1.78	6.96	10.44

从表2、表3可以看出,甘肃省和生态保护红线区内的生态系统服务供需模式不平衡都在逐渐缩小,这可以从生态系统服务供需模式的负向变化的比例下降和正向变化比例提高看出,如全省H-L到L-L的转化比例为1.19%,远远低于L-L到H-L的转化比例4.59%,而生态保护红线区L-L到H-L的转化比例更高达到5.97%,生态保护红线区对这种变化趋势贡献最多。主要原因是近年来地方政府逐渐放弃了以破坏生态环境换取经济发展的方式,结合甘肃省实际,大力发展绿色生态产业为主体的新质生产力,不仅提高了经济水平,而且有效保护和恢复了自然生态系统,服务供给能力大幅度提高。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)2000-2020年甘肃省生态系统服务供给率从东南到西北逐渐增加,甘肃西北部处于高位供应状态,甘肃中东部生态系统服务实际供给的转化率较低,南部生态保护红线区实际供给服务相对其他区域也较高。人类活动较低的生态保护红线区供需盈余较多,而人类活动较高的甘肃中部和北部绿洲区,供需比较低,处于或接近赤字状态,出现空间上供需错配。

(2)甘肃省各城市生态系统服务供需比在城市中心区处于低值区,远离城市中心则为高值区,呈“V”或多“V”型分布,生态系统服务供需比在城市中心区的降低幅度明显,受生态保护红线保护的生态环境较好地区的变化幅度相对较小,东西供需比梯度带的盈亏

明显优于南北供需比梯度带。

(3)省域范围内生态系统服务赤字总体上均有加剧的趋势,而生态系统服务盈余略有增加。生态保护红线区生态系统服务赤字总体上比省域范围内的小,供需失衡矛盾有所缓解,生态系统服务供需盈余水平下降的区域集中在非生态保护红线区。

(4)甘肃省大部分地区属于H-L、L-L格局,甘肃省生态系统服务供需失衡区域主要集中在经济水平较高的区域。生态保护红线政策实施以来,不论是生态保护红线区还是甘肃省生态系统服务供需模式负向变化的比例下降和正向变化比例提高,生态系统服务供需模式不平衡在逐渐缩小,但是甘肃省中部依然是供需矛盾最突出的区域,未来政策制定时,需要着重考虑该区域水土资源的合理开发利用,缓解人类活动对生态系统带来的压力。

3.2 讨论

本研究采用分区域生态系统服务供需评价矩阵,对甘肃省各项生态系统服务供需关系进行了分析,从供需匹配模式来看,2000-2020年甘肃省大部分地区属于H-L(高供给-低需求)、L-L(低供给-低需求)。虽然本研究采用的生态系统供需评价矩阵是专家打分法,其值的大小表征了生态系统服务供给与需求之间的相对关系,并且研究中根据甘肃省自然生态环境和社会经济的区域差异性对评价矩阵进行了改进,不同区域的专家打分值有所差异,故分区域生态系统服务供需评价矩阵能够在宏观尺度上有效表征多种生态系统服务供需空间变化状况。这与刘春芳等^[42]基于当量因子法和模型法对甘肃省生态系统服务供需

状况的研究结果一致。该研究通过对生态系统服务供需的空间匹配分析发现,甘肃省4项主要生态系统服务的供需匹配类型以“高供给-低需求”和“低供给-低需求”为主,其分布具有地域集聚性,空间分异特征明显。

本文虽然从空间和数量变化上对供需指数变化特征和供需格局时空变化规律进行了研究,但并没有将供需关系变化与人类活动的空间布局相耦合,无法充分反映生态系统服务供需平衡内部机理与驱动机制。因此未来研究主要应从生态系统服务供需平衡的驱动因素、生态系统服务流动、生态系统服务管理、生态系统服务需求与人类福祉的耦合机制拓展等方面展开。厘清生态系统服务供给和需求的相互作用机制,分析生态系统服务供需关系在自然、社会、经济影响下的变化过程,探索生态系统服务供需研究结果从理论到实际管理的应用模式。

生态保护红线政策是中国推进生态保护与建设的宏观政策,也是中国在全球首次提出并在全国实施。生态保护红线政策实施以来,数据获取、政策执行等方面面临着诸多挑战^[43],该政策实施对生态保护成效是国内外关注的核心问题,也是当前国际生态学领域研究的前沿课题。本文研究了生态保护红线区生态系统服务供需特征及时空变化,从研究结果看,生态保护红线区生态系统服务盈余水平远高于全省平均水平,高供给-低需求区域的面积在持续增加,生态保护的成效显著。但是,从供给服务和需求服务的空间分布上来看,存在明显的空间错位,也就是生态系统服务供给能力高的区域(生态保护红线区)往往本地的需求服务水平较低,供给服务过剩,而需求服务水平较高的区域,供给服务则不能满足当地人的需求,存在服务赤字,给当地生态环境造成过高的压力。生态保护红线政策实施过程中,在保证生态保护红线区供给服务大幅盈余的前提下,政府部门也要适当考虑将高供给区服务向低供给区服务调配。

[参考文献]

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387:253-260.
- [2] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*[M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] 夏沛,彭建,徐子涵,等. 生态系统服务流概念内涵与量化方法[J]. *地理学报*, 2024,79(3):584-599.
- Xia Pei, Peng Jian, Xu Zihan, et al. Conceptual connotation and quantification methods of ecosystem service flows[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024,79(3):584-599.
- [5] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: a comprehensive approach to quantifying actual services[J]. *Ecosystem Services*, 2013,4: 117-125.
- [6] Mathieu L, Tinch R, Provins A. Catchment management in England and Wales: the role of arguments for ecosystems and their services[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2018,27 (7):1639-1658.
- [7] 黄孟冬,肖玉,徐洁,等. 生态系统服务供需关系及空间流动研究进展[J]. *资源与生态学报*, 2022,13(5):925-935.
- Huang Mengdong, Xiao Yu, Xu Jie, et al. A review on the supply-demand relationship and spatial flows of ecosystem services[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 3(5): 925-93.
- [8] Vrebos D, Staes J, Vandenbroucke T, et al. Mapping ecosystem service flows with land cover scoring maps for data-scarce regions[J]. *Ecosystem Services*, 2015,13:28-40.
- [9] 顾康康,杨倩倩,程帆,等. 基于生态系统服务供需关系的安徽省空间分异研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2018,34(7): 577-583.
- Gu Kangkang, Yang Qianqian, Cheng Fan, et al. Spatial differentiation of Anhui Province based on the relationship between supply and demand of ecosystem services[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018,34(7):577-583.
- [10] Tao Y, Tao Q, Sun X, et al. Mapping ecosystem service supply and demand dynamics under rapid urban expansion: a case study in the Yangtze River Delta of China[J]. *Ecosystem Services*, 2022,56:101448.
- [11] Wang L J, Gong J W, Ma S, et al. Ecosystem service supply-demand and socioecological drivers at different spatial scales in Zhejiang Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022,140:109058.
- [12] 刘静,邹长新,林乃峰,等. 基于贝叶斯网络的南京市生态保护红线区人类活动干扰风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2023,39(10):1267-1276.
- Liu Jing, Zou Changxin, Lin Naifeng, et al. Bayesian network-based risk assessment under anthropogenic disturbance in the ecological conservation redline regions of Nanjing City[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023,39(10):1267-1276.
- [13] 赵晓阳,苏军德. 基于RS和GIS的祁连山地区生态保护红线划定方法研究[J]. *中国水土保持*, 2019, (8): 33-37.
- Zhao Xiaojiong, Su Junde. Study on ecological protection red line in Qilian Mountains based on remote sensing and GIS[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019,(8):33-37.
- [14] Boithias L, Acuña V, Vergoñós L, et al. Assessment of the

- water supply: demand ratios in a Mediterranean Basin under different global change scenarios and mitigation alternatives [J]. *Science of the Total Environment*, 2014,470/471:567-577.
- [15] 王雅敬,谢炳庚,李晓青,等. 喀斯特地区耕地生态承载力供需平衡[J]. *生态学报*, 2017,37(21):7030-7038.
Wang Yajing, Xie Binggeng, Li Xiaoqing, et al. Ecosystem carrying capacity balance of the karst region in China, based on the supply and demand of cultivated land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(21):7030-7038.
- [16] 张中浩,张永瑶,胡熠娜,等. 基于“水-能源-粮食”纽带的生态系统服务供需关系时空分布研究:以长三角生态绿色一体化发展示范区为例[J]. *生态学报*, 2023, 43(22): 9430-9445.
Zhang Zhonghao, Zhang Yongyao, Hu Yina, et al. Spatial and temporal distribution of supply-demand of ecosystem services in the demonstration zone of green and integrated ecological development of the Yangtze River Delta from the perspective of water-energy-food nexus[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(22): 9430-9445.
- [17] 钟孟君,蒋贵国,陆忆文,等. 中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务供需风险评价及分区[J]. *水土保持通报*, 2023,43(3): 225-233.
Zhong Mengjun, Jiang Guiguo, Lu Yiwen, et al. Risk assessment and zoning on supply and demand of water yield services in Pakistan Section of China-Pakistan Economic Corridor[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(3): 225-233.
- [18] 占焱,于洋,吴秀芹. 湟水流域生态系统服务供需匹配关系[J]. *生态学报*, 2021,41(18):7260-7272.
Zhan Tian, Yu Yang, Wu Xiuqin. Supply-demand spatial matching of ecosystem services in the Huangshui River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(18):7260-7272.
- [19] 孟庆香,张莉坤,位贺杰,等. 基于土地利用/覆被变化的伊河流域生态系统服务供需风险时空演变[J]. *生态学报*, 2022,42(5):2033-2049.
Meng Qingxiang, Zhang Likun, Wei Hejie, et al. Spatio-temporal evolution of the supply and demand risk of ecosystem services in the Yihe River Basin based on LUCC[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(5):2033-2049.
- [20] Bryan B A, Ye Y Q, Zhang J E, et al. Land-use change impacts on ecosystem services value: incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics[J]. *Ecosystem Services*, 2018,32:144-157.
- [21] 方朝阳,蔡振饶,赵华飞,等. 南昌市主城区生态系统服务供需匹配的城乡梯度特征研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2023,39(6):713-722.
Fang Zhaoyang, Cai Zhenrao, Zhao Huafei, et al. Urban-rural gradient feature of matching ecosystem services supply and demand in the main area of Nanchang[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023,39(6):713-722.
- [22] Larondelle N, Lauf S. Balancing demand and supply of multiple urban ecosystem services on different spatial scales[J]. *Ecosystem Services*, 2016,22:18-31.
- [23] 李倩,吴雅华,李佳芯,等. 基于生态系统服务供需关系的福州绿地生态网络构建分区[J]. *西北林学院学报*, 2022,37(2):238-247.
Li Qian, Wu Yahua, Li Jiixin, et al. Construction zoning of urban green space ecological network based on ecosystem service supply and demand in Fuzhou[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022,37(2):238-247.
- [24] Wang L J, Zheng H, Wen Z, et al. Ecosystem service synergies/trade-offs informing the supply-demand match of ecosystem services: framework and application[J]. *Ecosystem Services*, 2019,37:100939.
- [25] Zhai T L, Wang J, Jin Z F, et al. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111:106068.
- [26] 李佳滢,杨冬冬,杨菲,等. 城市化背景下景观格局对天津市生态系统服务供需匹配的影响[J]. *生态学报*, 2024,44(12): 4987-5002.
Li Jiaying, Yang Dongdong, Yang Fei, et al. Influence of landscape pattern on ecosystem service supply-demand mismatch in Tianjin within the context of urbanization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(12):4987-5002.
- [27] Li J H, Jiang H W, Bai Y, et al. Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions: a case study of the Taihu River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2016,60:1008-1016.
- [28] 谢余初,张素欣,林冰,等. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区[J]. *自然资源学报*, 2020,35(1):217-229.
Xie Yuchu, Zhang Suxin, Lin Bing, et al. Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(1):217-229.
- [29] Guo X Y, Zhang Y X, Guo D F, et al. How does ecological protection redline policy affect regional land use and ecosystem services? [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023,100:107062.
- [30] Yang M H, Xie Y. Spatial pattern change and ecosystem service value dynamics of ecological and non-ecological redline areas in Nanjing, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021,18(8):4224.
- [31] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014,69(1):3-14.
Liu Jiyuan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatio-temporal characteristics, patterns and causes of land use

- changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(1):3-14.
- [32] 赵晓同,苏军德,王建,等. 甘肃省生态服务供需关系及影响因子研究[J]. *中国环境科学*, 2021,41(10):4926-4941.
Zhao Xiaojiong, Su Junde, Wang Jian, et al. A study on the relationship between supply-demand relationship of ecosystem services and impact factors in Gansu Province[J]. *China Environmental Science*, 2021,41(10):4926-4941.
- [33] Bastian O, Syrbe R U, Rosenberg M, et al. The five pillar EPPS framework for quantifying, mapping and managing ecosystem services[J]. *Ecosystem Services*, 2013,4:15-24.
- [34] Burkhard B, Kroll F. Map of Ecosystem Services, Supply and Demand//Cleveland C J. *Encyclopedia of Earth*[R]. Washington, DC: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, 2010.
- [35] Burkhard B, Müller A, Müller F, et al. Land cover-based ecosystem service assessment of irrigated rice cropping systems in Southeast Asia: an explorative study[J]. *Ecosystem Services*, 2015,14:76-87.
- [36] 张骞,高明,杨乐,等. 1988-2013年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 566-575.
Zhang Qian, Gao Ming, Yang Le, et al. Changes in the spatial structure of ecological land and ecosystem service values in nine key districts of Chongqing City over the past 25 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2): 566-575.
- [37] 李政旸,徐佩,王玉宽. 成都市生态系统服务梯度时空特征及空间协调性演变[J]. *西南农业学报*, 2023,36(10):2077-2091.
Li Zhengyang, Xu Pei, Wang Yukuan. Spatial-temporal characteristics and spatial coordination evolution of ecosystem service gradients in Chengdu[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023,36(10):2077-2091.
- [38] 韩增林,刘澄浩,闫晓露,等. 基于生态系统服务供需匹配与耦合协调的生态管理分区:以大连市为例[J]. *生态学报*, 2021,41(22):9064-9075.
Han Zenglin, Liu Chenghao, Yan Xiaolu, et al. Coupling coordination and matches in ecosystem services supply-demand for ecological zoning management: a case study of Dalian[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(22):9064-9075.
- [39] 黄智洵,王飞飞,曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析:以闽三角城市群为例[J]. *生态学报*, 2018,38(12):4327-4340.
Huang Zhixun, Wang Feifei, Cao Wenzhi. Dynamic analysis of an ecological security pattern relying on the relationship between ecosystem service supply and demand: a case study on the Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou city cluster[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(12):4327-4340.
- [40] 曹容,张龙生,程小云,等. 甘肃省40年来森林蓄积量动态分析研究[J]. *甘肃科技*, 2019,35(24):178-180.
Cao Rong, Zhang Longsheng, Cheng Xiaoyun, et al. Dynamic analysis of forest stock in Gansu Province in the past 40 years[J]. *Gansu Science and Technology*, 2019,35(24):178-180.
- [41] 郭生祥,汪有奎,张建奇. 基于“3S”技术的祁连山自然保护区森林结构调查分析[J]. *甘肃林业科技*, 2011,36(1):15-18.
Guo Shengxiang, Wang Youkui, Zhang Jianqi. Investigation and analysis on forest structure of Qilian Mountain Nature Reserve on the basis of the “3S” technology[J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2011,36(1):15-18.
- [42] 刘春芳,李鹏杰,刘立程,等. 西北生态脆弱区省域国土空间生态修复分区[J]. *农业工程学报*, 2020,36(17):254-263.
Liu Chunfang, Li Pengjie, Liu Licheng, et al. Ecological restoration zoning of provincial territorial space in the ecologically fragile areas of northwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020,36(17):254-263.
- [43] Wong C P, Jiang B, Kinzig A P, et al. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy [J]. *Ecology Letters*, 2015,18(1):108-118.